

逆流中で発達する風波の碎波について

鶴谷 広一*・柳嶋 慎一**・松延 嘉國***

1. まえがき

本州東南海上いわゆる野島崎沖や、南アフリカ東南海上^{1),2)}では大型船舶が海難に遭遇することが多く、海難事故当時には予想を上回る高波が生じていたと言われている。その原因を予測することはむずかしいが、このあたりは局所的に流れの強い海域でもあることから、長距離を伝播してきた波と流れの干渉¹⁾および流れの上に発達した波の両方の影響が重なり合って大きな波となった可能性が考えられる。このように、実際の海には潮流や海流などの流れの大きい海域があり、そこでの風波の推算を行う場合には流れの影響を考慮しなければならない。特に、逆流上に発達する風波は通常の流れのない場合と比べて同じフェッチでも波高と波長が風速と流速の相対速度の差程度では説明できないほど大きくなるために、この現象を解明することは工学的見地からも極めて重要である。

これ迄は、流れの効果をフェッチで修正する形で等価吹送距離として取り入れて、逆流中ではフェッチが見掛け上増大し、順流中では逆に減少するとして波高と波長の発達を表す実験式が提案されている³⁾。この考え方によれば、波高と波長はフェッチと共に単調に増大し続けることになる。ところが、逆流の流速が大きくなってくると、波が急速に発達するために碎波が顕著になり、このために波高の減衰が生じることが著者らによって指摘されたり、流れの中での風波の推算法を確立するためには、このように碎波を伴った波の発達の多様性について

も十分な知識を持つておく必要がある。そのために、本研究では逆流中で発達する風波の碎波の実態と基本的性質を調べる目的で風洞実験を行った。

2. 実験装置と実験方法

実験には港湾技術研究所の大型風洞水路を使用した。その平面図を図-1に示す。

流速の条件は断面平均流速 ($\bar{U}_w$) が -47.4 cm/s と -67.2 cm/s の2ケースで、風速は断面平均 ($\bar{U}_a$) で 7.2 , 8.6 , 10.0 および 11.3 m/s の4ケースである。

波の測定には抵抗線式波高計を用いた。測定点はフェッチ F が 6.75 m, 8.25 m, 9.75 m, 18.75 m, 26.25 m で、波長を測る場所には2本の波高計を 10.25 cm だけ離して設置した。なお、水深はすべてのケースで 50 cm とした。

波の碎波状況をモニターするために、波高計による波の測定と同時にビデオシステム（日本事務光機(株)）による波の撮影を行った。撮影には高速度ビデオシャッターカメラ（露光時間 $1/1000$ 秒）を2台用いた。1台は波高と波速および碎波の状況の記録のために望遠レンズで撮影し、もう1台は波長の記録のために広角レンズを用いて撮影した。これら2台のカメラからの出力は映像特殊効果装置（日本ビクター(株), TF-1310）で画面合成し、ビデオテープレコーダに記録した。記録する際に、ビデオタイム・データジェネレータ（VT-1000G）により $1/100$ 秒単位の時刻を画面に表示させ、後の解析に利用した。

撮影したビデオの解析にはビデオ・ポジションアナライザ（VPA-1000）とタイム・データリーダー（VT-1000R）を用いて波高、波長を読み取り、また波の峰の移動速度を求めてこれを波速とした。これらのデータは、一波ごとに波が碎波か非碎波かという情報も含めてパソコン（TEAC, PS-9000 Model 216）のマイクロ・フロッピーディスクに記録した。

実験方法は、あらかじめ流れのある上に所定の回転数に達した送風機直後のゲートを開けることによって風を急に吹かせ、それからの波の発達を記録している。ゲートの開いた瞬間を時刻0とし、このゲートオープン信号

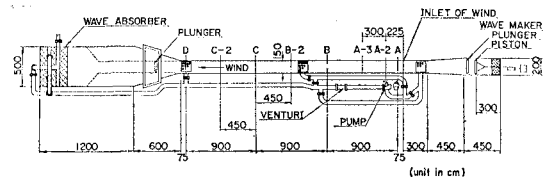


図-1 実験水路平面図

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部水理研究室
 ** 運輸省港湾技術研究所 水工部源砂研究室
 *** 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部水理研究室

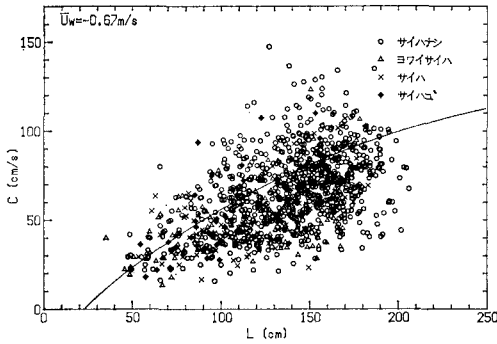


図-2 波長と波速の関係(ビデオによる解析)

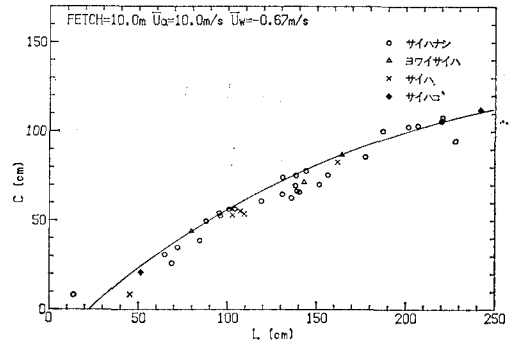


図-4 波長と波速の関係(波高計による解析)

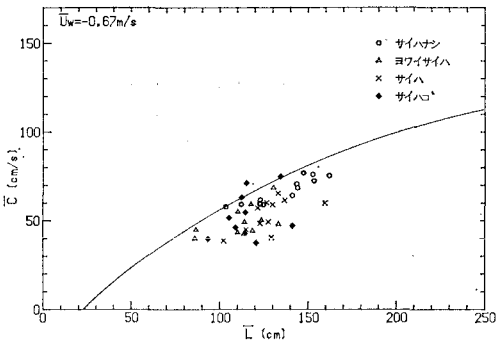


図-3 平均波長と平均波速の関係(ビデオによる解析)

と共に波高計の記録は直接デジタルデータレコーダに記録された。一方、画像に記録される時刻はやはりゲートオープンの瞬間を0としてビデオテープレコーダに記録された。

3. 実験結果と考察

(1) 波長と波速の関係

ビデオから1波ごとの波長と波速を読み取り、その関係をプロットしたのが図-2である。図中の記号で“サイハナシ”は碎波せずに進行する波，“ヨワイサイハ”は波頂から前方へ崩れるいわゆる崩れ波，“サイハ”は波頂が大きく巻き込むように崩れる巻き波で、時に空気を巻き込むような碎波を表している。また，“サイハゴ”は解析する画面(望遠レンズの方のカメラの撮影範囲としては約80cmの領域)に入る前から既に碎波している波を表している。これらの図には、フェッチと風速の異なるデータを区別せずにプロットしてある。図中の実線による曲線は、吹送流を考慮した流れの中での波長に対する波速の理論計算⁵⁾による関係を示したものである。対応する実験ケースは $\bar{U}_a = 10.0$ m/s, $\bar{U}_w = -67.2$ cm/s のものである。計算に用いた流速分布は次の式で表される。

$$u(y) = U_0 - U_T \ln \frac{z_0 - y}{z_0} - b_1 y \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 y は静水面上鉛直上向きを正にとり、 U_0 は表面流速、 z_0 は水面における粗度、 U_T , b_1 は実験から求まる定数である。図-2の曲線に対しては、実測の流速分布から $U_0 = -41.8$ cm/s, $z_0 = 0.348$ cm, $U_T = 12.81$ cm/s, $b_1 = 1.009$ s⁻¹ を与えて計算している。

図-2によると、一波一波の波速はかなりバラツキが見られるので、各フェッチ、風速ごとに平均した平均波長 $\bar{L}$ と平均波速 $\bar{C}$ の関係を示したのが図-3である。碎波していない波は理論値と比較的近い値をとるが、碎波した波は波速がやや小さくなっている。

ビデオの画面の中央に設置してある2本の波高計(間隔は10.25 cm)からゼロアップクロス法により波を検出し、それぞれの波高計を通過する波のゼロアップクロス点の時間間隔から波速と波長を求めたのが図-4である。この場合は求めた波速 C から

$$L = CT \quad \dots\dots\dots (2)$$

の関係をを用いて波長を求めた。ここに、 T は2本の波高計でそれぞれ得られた周期を平均したものである。ビデオの結果と対比させ、対応のつくものだけを取り出し、碎波の状態に対して前の2つの図と同様の記号を用いてあるが、碎波・非碎波を問わず理論値ときわめてよく一致している。

このように、空間波形と時間波形から求めた波長と波速の関係には差が生ずることがわかったが、波の変形がなければ二つの解析法による結果は一致するはずである。流れの中での進行波の空間波形による解析と、時間波形による解析でどの程度の違いが生ずるのかを知るために、次に簡単なシミュレーションで検討を行うことにする。

(2) 流れの中を進行する波のシミュレーション

逆流の流速が $\bar{U}_w = -67.2$ cm/s, 風速が $\bar{U}_a = 8.6$ m/s のケースについて検討する。このときの式(1)の中の定数は、 $U_0 = -59.2$ cm/s, $z_0 = 1.632$ cm, $U_T = 14.19$ cm/s,

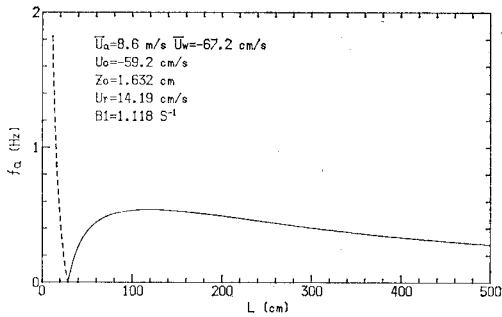


図-5 波長と周波数の関係

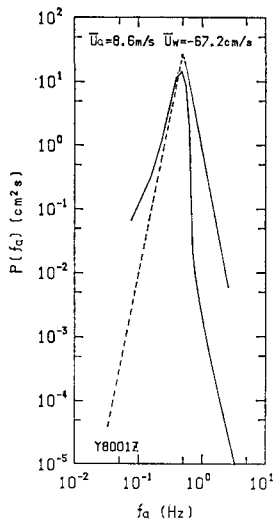


図-6 スペクトル図

いスペクトルを持つ波を合成する。図-6の破線と細い実線で表されたものが、ほぼ実測のスペクトル形を表すが、高周波数側は図-5で示したように進行波からの寄与はないので合成波を作る場合には無視する。波長としては、 $C_g=0$ となる波長よりもやや長い $L=162.7$ cm ($f_a=0.54$ Hz) 以上の波長だけを考慮する。周波数を 0.005 Hz に分割し、 108 個の成分波を合成した波を作る。この波形をスペクトル計算した結果を図-6の太い実線で示す、こうして得られた流れの中を進行する波の空間波形を図-7に示すが、上と下の図では時間に 1 秒の差がある。図-8は空間波形から読み取った波速と、時間波形から読み取った波速の関係を示したものである。空間波形では、波の峰の移動速度から求めた波速 C_x (Crest) を白丸で、平均水面をゼロアップクロスする点での移動速度から求めた波速 C_x (Zero-upcrossing) を黒丸で示したが、前者と時間波形から求めた波速 C_t の相関係数が 0.76 、後者と C_t との相関係数が 0.98 である。このように、空間波形のゼロアップクロス点の移動速度から求めた波速の方が C_t により近い値が得られる。

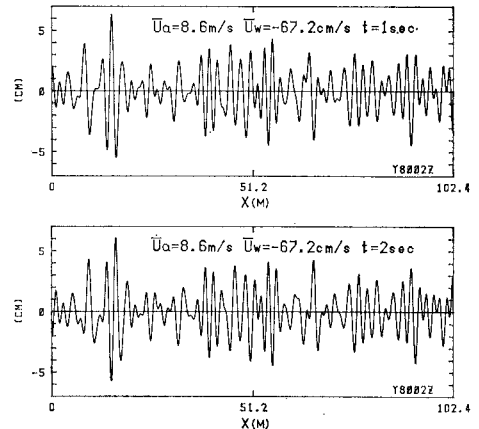


図-7 合成波の空間波形

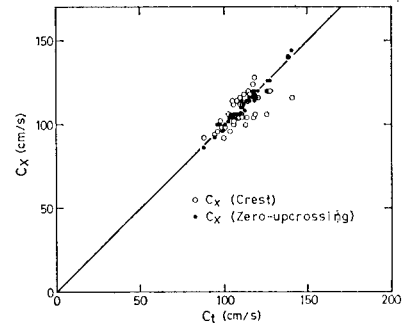


図-8 時間波形と空間波形の波速の関係

しかし、ビデオによる解析ではゼロアップクロス点を決めることはむずかしいので峰の移動速度から波速を求めなければならないが、時間波形から求めたものとは差が出ることを考慮しておかなければならない。また、波長についても検討したが、やはり波速と同様の結果が得られた。

(3) 波高と波長の発達

流れの中で発達した風波の有義波高 $H_{1/3}$ と卓越波の波長 L とは次の関係にある⁴⁾。

$$H_{1/3} = 0.0197 \frac{u_{*a}^2}{g} \left(\frac{u_{*a} f}{g} \right)^{-1.89} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$f = \frac{1}{L} \left\{ \left(\frac{gL}{2\pi} + \frac{2\pi T_1}{\rho L} \right) \tanh \frac{2\pi h}{L} \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 g は重力の加速度、 T_1 は水の表面張力、 ρ は水の密度、 h は水深、 u_{*a} は風の摩擦速度、 f は卓越波の周波数に対応する真の周波数である。

さらに、式 (3), (4) は次のように書き替えることができる⁴⁾。

$$\bar{H} = 0.0937 H_*^{0.055} \bar{L}^{0.945} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\bar{H}$ は平均波高、 $\bar{L}$ は平均波長、 $H_* = u_{*a}^2/g$ である。

ビデオから波高と波長を直接読み取り、その関係をプロットしたのが 図-9 である。これはフェッチが 10 m の地点のもので、流速が -67.2 cm/s 、風の摩擦速度 u_{*0} は 59 cm/s のケースである。図中の実線は式 (5) の関係を示している。実測値は破線で全体の変化の幅と傾向を示してあるが、波長の短いところではほぼ式 (5) に従って波は発達するものの、波長が大きくなるにつれて碎波する波が生じ、碎波後は波長が大きくなって波高はそれほど増加していない。平均的な傾向としては、同じ波長に対して波高は式 (5) よりも小さめとなっている。浜田⁹⁾によれば、最高波の波形勾配は次式で表される。

$$\frac{H}{L} = 0.142 \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式 (6) は流れのないところでの限界波形勾配を与えるものであるが、図-9 には式 (6) の関係が示されている。流れの条件によっても変わるが、図-9 の場合には波長が長くなると波形勾配が式 (6) より小さくても碎波する波が多い。

図-10 はフェッチが 10, 19, 26 m で撮影されたビデオから波長と波高を読み取り、その平均値をプロットしたものである。図中の線分が標準偏差を表す。平均するのに用いた波は十分発達してからのもので用いた。各フェッチとも平均波長と平均波高の関係は式 (5) よりも波高が小さくなっている。図-10 には有義波高と波

長の関係を表す式 (3), (4) と、流れのない場合に風洞水路で得られた有義波高と波長の関係⁷⁾も示してある。

図-11 は横軸に平均波速 $\bar{C}$ と流れに対する表面流速の大きさを表す $U_0 - \bar{U}_w$ の比をとり、縦軸に波形勾配の平均値をとったものである。流れの平均流速 $\bar{U}_w$ が 0.0, -14.5 , -20.3 , -26.3 cm/s のケースは 2 本の波高計によって波速、波長、波高が求められたものである。図-11 は、表面流速の大きさに対して波速が大きくなると、波形勾配が $-4/3$ 乗の勾配で小さくなることを示している。

(4) 碎波率

風のかげ始めから 20 秒間ずつを区切り、その間に通過した波の総数を N とする。この中で、完全に碎波している波の数を n_b 、弱い碎波の数を n_w とすると、完全に碎波している波の碎波率 R_b は次式で表される。

$$R_b = \frac{n_b}{N} \quad \dots\dots\dots (7)$$

また、弱い碎波まで含めた碎波したすべての波の碎波率は

$$R = \frac{n_b + n_w}{N} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

図-12 は、風のかげ始めからの碎波率の変化の一例である。碎波率は 60 秒、130 秒、200 秒前後で大きくなりその間では小さくなっている。すなわち、風がかか

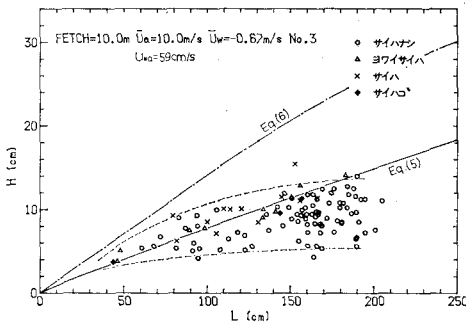


図-9 波長と波高の関係

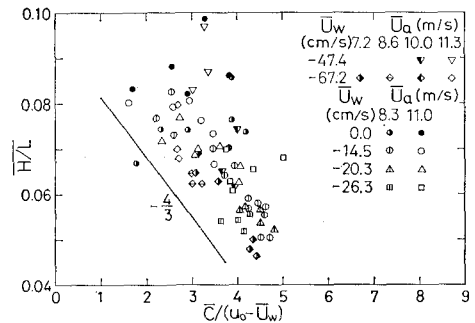


図-11 H/L と $\bar{C}/(U_0 - U_w)$ の関係

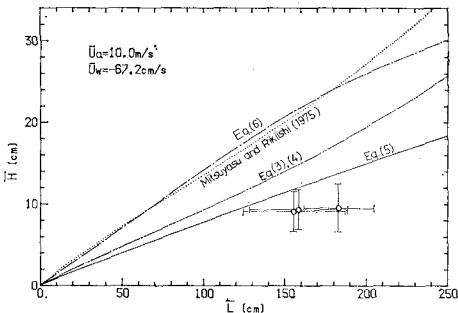


図-10 平均波長と平均波高の関係

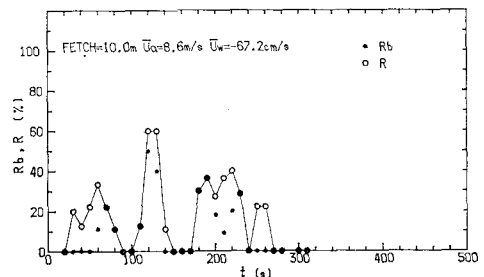


図-12 碎波率の時間変化

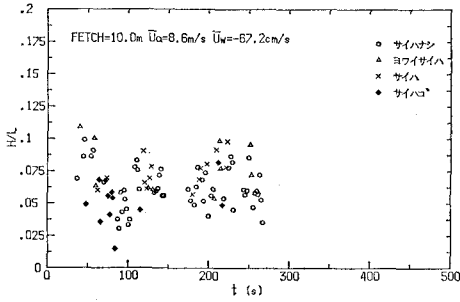


図-13 波形勾配の時間変化

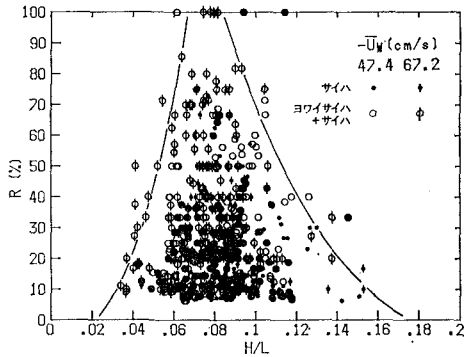


図-14 波形勾配と碎波率の関係

から波は碎波したり、しなかったりをくり返しながらか発達する。図-13は図-12と同じデータについて、波形勾配の時間変化を示したものである。図-12と比較すると、波形勾配が大きくなったところと碎波率の大きいところがほぼ一致しているのがわかる。すなわち、碎波率と波形勾配には何らかの関係があるものと考えられる。

このことを詳しく見るために、 $\bar{U}_w = -47.4 \text{ cm/s}$ と、 -67.2 cm/s の全ケースについて波形勾配と碎波率の関係をプロットしたのが図-14である。波形勾配は20秒間に通過する波の平均値を用いている。また、碎波率も20秒間ずつ区切って計算し、次には前の10秒間をオーバーラップさせて次々に計算をくり返している。

図によれば、逆流の流速が大きい $\bar{U}_w = -67.2 \text{ cm/s}$ のケースの方が全般的に碎波率が大きい、ケースによらず波形勾配がほぼ0.08付近で碎波率が大きくなる傾向にある。波形勾配が大きい波は、発達初期のものが多いので除外して考えると、発達した波については波形勾配は0.1程度までの波がほとんどであると言える。

4. あとがき

逆流中で発達する風波の波速、波高および波長と碎波の関係について検討した。流れの中を進行する波の碎波についてはまだ不明な点が多く、特に風波の場合は吹送流があるために一層現象が複雑になっている。本研究では、碎波することにより、波の峰の移動速度が小さくなること、および碎波が生じるような逆流のもとでの波の発達、従来から提案されている流れの中での風波の発達の式で表されるほど同じ波長に対して波高が大きくなることを実験的に示した。今後は碎波の条件を更に明確にして、波の推算式に取り入れることを考える必要がある。

参考文献

- 1) Smith, R.: Giant waves, J. Fluid Mech., Vol. 77, part 3, pp. 417~431, 1976.
- 2) Mallory, J.K.: Abnormal waves on the south east coast of South Africa, Int. Hydrog. Rev., Vol. 51, pp. 99~129, 1974.
- 3) 加藤 始・鶴谷広一・寺川博也: 流れの中の風波の実験的研究(第3報), 港湾技術研究所報告, 第20巻, 第3号, pp. 93~129, 1981.
- 4) 鶴谷広一・中野 晋・柳嶋慎一: 逆流中の風波の発達特性について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 214~218, 1985.
- 5) Kato, H.: Calculation of the wave speed for a logarithmic drift current, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 13, No. 4, pp. 3~32, 1974.
- 6) たとえば, 岩垣雄一・榎木 亨: 海岸工学, 共立出版, 463p., 昭和54年.
- 7) Mitsuyasu, H. and Rikiishi, K.: On the growth of duration-limited wave spectra, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., Vol. 23, No. 72, pp. 31~60, 1975.